

# 微电网二次频率/电压控制器的反馈线性化 设计及分布式实现

吴亮<sup>1</sup>, 刘庆楷<sup>2</sup>, 唐翀<sup>2</sup>, 刘明波<sup>2</sup>

(1. 广州环保投资集团有限公司, 广东 广州 510330; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 针对以微型同步发电机组为二次控制主体的微电网, 提出了一种在孤岛运行模式下的二次频率/电压分布式控制策略。首先, 利用反馈线性化方法, 设计了一种适用于微型同步发电机的二次频率/电压控制器, 可消除由于微型同步发电机组一次控制导致的系统频率与电压偏差。其次, 基于多代理系统理论, 提出了一种分布式控制策略。所提出的频率/电压控制器只需要交换在通信有向图上的邻居节点频率/电压信息, 不依赖中央控制器和复杂通信网络, 提高了微电网的可靠性, 同时可实现微型同步发电机有功出力按额定比分配。最后, 在某一实际的微电网上验证了提出的二次控制策略的有效性。

**关键词:** 孤岛微电网; 频率/电压二次控制; 反馈线性化; 分布式控制

## Design of secondary frequency/voltage controller with feedback linearization and distributed implementation in microgrids

WU Liang<sup>1</sup>, LIU Qingkai<sup>2</sup>, TANG Chong<sup>2</sup>, LIU Mingbo<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Environmental Protection Investment Group Co., Ltd., Guangzhou 510330, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** Aiming at the island microgrid with micro-synchronous generator as the main sources of secondary controls, a distributed secondary frequency/voltage control scheme is proposed. First, a feedback linearization method is used to design a frequency/voltage controller suitable for micro-synchronous generators, which can eliminate the frequency and voltage deviation caused by the primary control of micro-synchronous generators. Then, a distributed control scheme is proposed based on multi-agent system theory. The proposed frequency/voltage controller only needs to exchange the frequency/voltage and active power information with its neighbors, which is independent of the centralized controller and complex communication networks and improves the reliability of the microgrid. Meanwhile, the active power outputs of micro-synchronous generators can be allocated according to their rated ratios. Finally, the effectiveness of the proposed secondary control scheme is verified on a real microgrid.

This work is supported by National Key Basic Research and Development Program of China (973 Program) (No. 2013CB228205).

**Key words:** islanded microgrids; secondary frequency/voltage control; feedback linearization; distributed control

## 0 引言

受日益增长的电力能源需求的影响, 越来越多的分布式电源, 包括可再生能源发电已经并入到电网之中。微电网作为智能电网的重要组成部分, 是

促进分布式发电有效集成的小规模电力系统<sup>[1-3]</sup>。微电网可以工作在并网模式和孤岛模式。在并网模式中, 主网可以为微电网提供电压与频率支撑, 此时微电网可以工作在功率控制模式, 以此来提供期望的有功和无功功率。当微电网脱离主网工作在孤岛模式, 微电网在维持系统内频率/电压稳定的同时, 也需要实现有功和无功功率的控制。微电网中发电单元的并网接口分为两类, 一类是逆变器型接口,

一类为同步发电机型接口。

在基于逆变器的孤岛微电网中，下垂控制取得了广泛的应用<sup>[4-6]</sup>。由于下垂控制的应用，发生负荷突变时，孤岛微电网的稳态频率与电压将会偏离额定值。为了补偿由于下垂控制导致的电压与频率偏差，二次控制策略被提出并应用到微电网中。传统的微电网二次控制采用集中式的结构，利用中央控制器采集全局信息并下发控制指令<sup>[7]</sup>，这种架构增加了通信负担，提高了微电网运行成本，容易受到通信延迟与单点故障的影响，即插即用能力弱，对中央控制器依赖较大，中央控制器故障可能引起整个系统的失效，降低了可靠性。

解决上述问题的有效方法是采用多代理系统的控制结构。可将微电网中的发电单元看作智能代理，各个智能代理根据预先设定的通信网络相互通信，共同完成既定的控制目标，避免了对中央控制器的依赖。文献[8-9]提出基于一致性的控制策略，实现不同额定功率的分布式电源的有功和无功功率均分。文献[10-11]通过反馈线性化的方法将微电网二次电压/频率控制问题转化为多代理系统的跟踪同步问题，从而设计出分布式二次控制器。文献[12]同样根据反馈线性化的思想，提出了分布式固定时间二次频率/电压控制器以实现微电网频率恢复与有功功率均分。上述提到的分布式控制策略的控制主体均为基于下垂控制的分布式电源。

关于逆变器型分布式电源的建模与控制，基于控制理论的研究已取得了丰硕成果，然而采用逆变器接口的分布式电源并不具备同步发电机的较大转动惯量，而且并网逆变器在不同控制模式间切换时会有较大的暂态冲击，给微电网的稳定运行带来了一定的影响<sup>[13]</sup>。而同步发电机的自平衡能力、下垂特性与大转矩惯量等特点有利于多台同步发电机的稳定运行<sup>[14]</sup>。一些微电网为了提高系统的电能质量与可靠性，可能会采用同步发电机型接口的发电单元，如沼气发电机、柴油发电机等微型同步发电机作为微电网内的主要发电单元<sup>[15]</sup>。

在含有同步发电机型接口的孤岛微电网中，集中式结构仍然为主要的二次控制框架。文献[16]在某实际海岛孤岛微电网中采用集中式的二次频率控制框架，以柴油发电机作为二次控制的主要电源，微电网中央控制器采集了系统的频率偏差，通过PI控制器计算出系统的总有功功率缺额，再对每一台柴油发电机下发有功功率调节指令。文献[17]采用了集中式二次电压控制框架，微电网中央控制器将母线参考电压值与其实际电压值的偏差送入PI控制器，得到计划外的无功功率后再对每台柴油发电

机的励磁控制器下发无功功率调节指令。上述集中式控制框架仍然存在前文提到的通信负担重，鲁棒性差，即插即用能力弱的缺点，需要引入分布式的控制框架提高系统的可靠性与控制的灵活性。然而当前针对同步发电机的分布式控制研究较少；再者，同步发电机包含了较多的控制单元，例如调速系统，自动电压调节器与电力系统稳定器等<sup>[18]</sup>，其动态性能与控制方式与基于逆变器接口的分布式电源有较大的不同，直接将基于下垂控制的分布式控制策略直接应用于同步发电机组上有一定的难度。

受文献[10-11]研究思路的启发，本文将反馈线性化方法与多代理系统理论结合，应用于孤岛微电网中同步发电机组的分布式控制。根据同步发电机的一次控制特性，考虑其在调节过程中的非线性动态，采用反馈线性化方法，设计了适用于微型同步发电机的二次频率/电压控制器，并且引入多代理系统理论对其进行分布式处理，以消除由于一次控制产生的频率/电压偏差并实现有功均分。并以某实际孤岛微电网为例验证了所设计的分布式二次频率/电压控制器的有效性。

### 1 微电网多代理控制结构

在含同步发电机型接口发电单元的微电网中，由于微型同步发电机出力稳定，可调可控，故将其设为二次频率/电压控制的主体。而光伏发电与风电的出力具有随机性，不可调度，则不参与微电网的二次控制，仅参与一次控制。

图1描述了这类微电网的多代理控制结构。该控制结构并不依赖集中控制器。

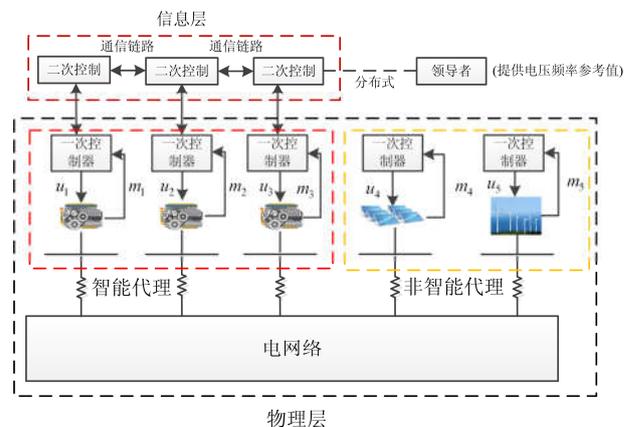


图1 含同步发电机接口发电单元的微电网多代理控制框架

Fig. 1 Distributed control framework for microgrids with generating units interfaced by synchronous generators

对于微电网二次控制，定义一个虚拟代理提供电压/频率参考值，称为领导者，且只有少数代理能

够与领导者进行通信, 即观测到系统的频率与电压参考值信息。参与二次控制的同步发电机可看作具有通信、传感以及计算能力的智能代理, 根据事先设计的分布式控制协议, 各个智能代理通过通信链路与相邻的代理进行通信后, 将获取的邻居信息与自身信息一同传到二次控制器, 独立地解算出二次控制信号后, 结合一次控制器, 将系统的频率与电压恢复到额定值。

## 2 微型同步发电机的调频/调压特性

根据微型同步发电机的调速系统与励磁控制系统的相关性质, 可以得到微型同步发电机的频率调节特性与电压调节特性。

$$\omega_i - \omega_{\text{ref}} = -R_i(P_i - P_{\text{ref}i}) \quad (1)$$

$$V_{Gi} = V_{ni} \quad (2)$$

其中, 式(1)表示微型同步发电机调速器的下垂特性, 如图 2 所示。 $\omega_i$  表示第  $i$  台微型同步发电机的输出角频率;  $\omega_{\text{ref}}$  表示微型同步发电机的输出角频率参考值, 一般设为  $100\pi$ ;  $R_i$  为微型同步发电机的调差系数, 取正值, 微型同步发电机从空载到满载一般有 5%~6% 的调差系数<sup>[18]</sup>;  $P_i$  表示第  $i$  台微型同步发电机输出的有功功率,  $P_{\text{ref}i}$  表示第  $i$  台微型同步发电机在额定频率下的有功功率设定值, 为微电网二次调频的主要调节量。

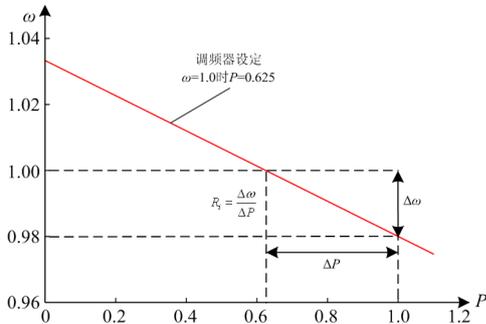


图 2 微型同步发电机调速系统静态下垂特性

Fig. 2 Droop characteristic of speed governing system

式(2)则表示微型同步发电机的无差电压调节特性。在实际运行中, 微型同步发电机的电压自然调差系数近似于 0, 也就是说励磁系统可以自动调整励磁电流使机端电压维持在给定值附近<sup>[19]</sup>。通常, 对于孤岛微电网二次电压恢复有两个目标: ①考虑微电网本身存在大量本地负荷因此希望二次电压控制使各发电单元的输出电压同步为额定电压, 以保证本地负荷的电压质量; ②当微电网存在某关键母线, 希望各参与二次电压控制的发电单元共同作用, 使该母线的电压保持为参考值<sup>[20]</sup>。本文主要

研究第二种目标, 文中所述的一次电压偏差均是针对关键母线而言。在式(2)中,  $V_{Gi}$  为第  $i$  台微型同步发电机的机端电压;  $V_{ni}$  为第  $i$  台微型同步发电机机端电压的控制输入量。

综上所述, 本文根据式(1)和式(2)代表的微型同步发电机的调频/调压特性, 利用反馈线性化的方法设计二次频率/电压控制器, 并引入了多代理系统理论将其分布式化, 当系统产生频率与电压偏差时, 二次控制器会更新各台微型同步发电机有功参考值  $P_{\text{ref}i}$  与电压控制输入量  $V_{ni}$ , 使系统的频率与关键母线电压恢复到额定的水平。

## 3 基于输入输出反馈线性化的二次频率/电压控制器设计及分布式实现

### 3.1 有向图与拉普拉斯矩阵的定义

智能代理之间的通讯拓扑可以用有向图的形式表示<sup>[10]</sup>。微电网中的微型同步发电机作为智能代理, 可以在有向图中可以用节点表示。有向图中的边可以看作是通讯网络中的通讯链路。一个有向图通常可以表示为  $G_r = (V, E, A)$ 。其中,  $V = \{v_1, \dots, v_n\}$  代表有向图中的节点集合;  $E \subset V \times V$  代表有向图中的边,  $A = [a_{ij}] \in R^{N \times N}$  代表邻接矩阵。由于在本文中, 通讯网络的有向图假设为时不变的, 所以邻接矩阵  $A$  为常数矩阵。从节点  $j$  指向节点  $i$  的边可以用  $(v_j, v_i)$  的形式表示。这意味着节点  $i$  从节点  $j$  获取信息,  $a_{ij}$  为边  $(v_j, v_i)$  的通讯权重。如果  $(v_j, v_i) \in E$  则  $a_{ij} > 0$ , 否则  $a_{ij} = 0$ 。如果, 节点  $j$  也被称作为节点  $i$  的邻节点。节点  $i$  的相邻节点可以用集合  $Ni = \{j | (v_j, v_i) \in E\}$  表示。对于有向图, 如果节点  $j$  是节点  $i$  的邻节点, 则节点  $i$  可以从节点  $j$  中获取信息, 反之亦然。入度矩阵(in-degree matrix)定义为  $D = \text{diag}\{d_i\} \in R^{N \times N}$ , 其中

$$d_i = \sum_{j \in Ni} a_{ij} \quad (3)$$

拉普拉斯矩阵则被定义为  $L = D - A$ 。在矩阵  $L$  中, 所有行的元素之和为 0, 即  $LI_N = 0$ , 其中  $I_N$  为所有元素均为 1 的单位列向量。

### 3.2 分布式二次频率控制器设计

当微型同步发电机输出频率为  $\omega_i$  不等于额定值时, 二次控制的目标是计算出合理的微型同步发电机功率参考值使得各台微型同步发电机的输出频率  $\omega_i$  同步到参考值  $\omega_{\text{ref}}$ 。将  $P_{\text{ref}i}$  作为变量, 将式(1)对时间进行微分可得:

$$\dot{\omega}_i = -R_i(\dot{P}_i - \dot{P}_{\text{ref}i}) = u_{\omega i} \quad (4)$$

其中,  $u_{\omega i}$  为引入的频率辅助控制。

因此, 微电网的二次频率控制变成了一个一阶线性的多代理系统同步问题, 具体可表述为如下形式:

$$\begin{cases} \dot{\omega}_1 = u_{\omega 1} \\ \dot{\omega}_2 = u_{\omega 2} \\ \vdots \\ \dot{\omega}_n = u_{\omega n} \end{cases} \quad (5)$$

为了实现协调的一致性, 引入分布式协议, 每个参与调频的微型同步发电机都按照图  $G_r$  进行通讯。 $u_{\omega i}$  只与自己本身及其邻居信息相关, 可以得到:

$$u_{\omega i} = -c_{\omega} e_{\omega i} \quad (6)$$

式中,  $c_{\omega} \in \mathbf{R}$ ,  $e_{\omega i}$  为频率本地跟踪误差:

$$e_{\omega i} = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\omega_i - \omega_j) + g_i (\omega_i - \omega_{\text{ref}}) \quad (7)$$

式中:  $\omega_{\text{ref}}$  为系统频率参考值;  $g_i$  为牵引增益。若微型同步发电机  $i$  能与领导者通讯, 观测到系统的参考值信息(频率与电压参考信息), 则  $g_i > 0$ , 否则  $g_i$  等于 0。

可以把式(7)代表的频率本地跟踪误差写成全局形式。

$$e_{\omega} = (\mathbf{L} + \mathbf{G})(\omega - \omega_{\text{ref}}) \equiv (\mathbf{L} + \mathbf{G})\delta \quad (8)$$

式中: 定义全局变量  $e_{\omega} = [e_{\omega 1}, e_{\omega 2}, \dots, e_{\omega n}]^T$ ;  $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n]^T$ ; 并且  $\omega_{\text{ref}} = \mathbf{I}_N \otimes \omega_{\text{ref}}$ ;  $\mathbf{I}_N$  为长度为  $N$  的单位列向量;  $\otimes$  代表克罗内克积;  $\mathbf{L}$  代表拉普拉斯矩阵;  $\mathbf{G} \in \mathbf{R}^{N \times N}$  是一个对角矩阵, 其对角元素为牵引增益  $g_i$ ;  $\delta$  为频率全局误差。

根据式(4)和式(6), 可以得到微型同步发电机有功参考值的表达式:

$$P_{\text{ref}i} = \frac{\int (u_{\omega i} + R_i \dot{P}_i)}{R_i} = \frac{\int (R_i \dot{P}_i - c_{\omega} e_{\omega i})}{R_i} \quad (9)$$

在微电网中, 各微型同步发电机要求对输出有功功率按照额定比进行分配, 因此微型同步发电机输出的有功功率应满足:

$$\frac{P_1}{P_{\max 1}} = \frac{P_2}{P_{\max 2}} = \dots = \frac{P_n}{P_{\max n}} \quad (10)$$

由于微型同步发电机调差系数的选取是与其最大有功功率输出相关, 所以式(10)又等同于:

$$R_1 P_1 = R_2 P_2 = \dots = R_n P_n \quad (11)$$

微电网的二次频率控制需要满足式(10)与式(11)的要求。因此对式(9)中的  $R_i \dot{P}_i$  进行分布式协调控制:

$$\begin{cases} R_1 \dot{P}_1 = u_{p1} \\ R_2 \dot{P}_2 = u_{p2} \\ \vdots \\ R_n \dot{P}_n = u_{pn} \end{cases} \quad (12)$$

为了实现同步, 也同样引入分布式协议, 参与调频的微型同步发电机需要按照预先设定的有向图进行通讯,  $u_{pi}$  的值仅与微型同步发电机本身及其邻居信息有关。

$$u_{pi} = -c_p e_{pi} \quad (13)$$

其中,  $c_p \in \mathbf{R}$ ,  $e_{pi}$  为功率本地跟踪误差:

$$e_{pi} = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (R_i P_i - R_j P_j) \quad (14)$$

将式(6)与式(13)代入式(4)得:

$$P_{\text{ref}i} = \frac{\int (u_{\omega i} + u_{pi})}{R_i} = \frac{-\int (c_{\omega} e_{\omega i} + c_p e_{pi})}{R_i} \quad (15)$$

分布式二次频率控制器的框图如图 3 所示。

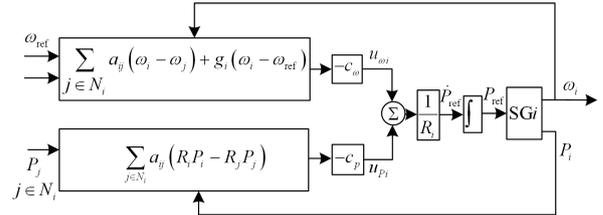


图 3 分布式二次频率协调控制框图

Fig. 3 Block diagram of secondary distributed frequency control

### 3.3 分布式二次电压控制器设计

当微电网的关键母线电压幅值不等于额定值时, 二次控制的目标是设计合理的控制器, 使各微型同步发电机的机端电压  $V_{Gi}$  同步到合适的电压值, 以恢复由于微型同步发电机一次调整产生的母线电压偏移。

将  $V_{ni}$  作为变量, 将式(2)对时间进行微分可得:

$$\dot{V}_{Gi} = \dot{V}_{ni} = u_{vi} \quad (16)$$

其中,  $u_{vi}$  为引入的电压辅助控制。微电网的二次电压控制转化成了一个一阶线性多代理系统的跟踪同步问题:

$$\begin{cases} \dot{V}_{G1} = u_{v1} \\ \dot{V}_{G2} = u_{v2} \\ \vdots \\ \dot{V}_{Gn} = u_{vn} \end{cases} \quad (17)$$

为了实现协调的一致性, 同样引入分布式协议, 每个参与调频的微型同步发电机都按照图  $G_r$  进行通讯。 $u_{vi}$  只与自己本身及其邻居信息相关, 可以得到:

$$u_{vi} = -c_v e_{vi} \quad (18)$$

其中,  $c_v \in \mathbf{R}$ ,  $e_{vi}$  为机端电压本地跟踪误差:

$$e_{vi} = \sum_{j \in N_i} a_{ij} (V_{Gi} - V_{Gj}) + g_i (V_{Gi} - V_{\text{ref}}) \quad (19)$$

其中,  $V_{\text{ref}}$  为各微型同步发电机的机端电压参考值。

牵引增益  $g_i$  的取值与 3.2 一致, 不再赘述。

可以把式(19)代表的本地跟踪误差写成全局形式:

$$e_v = (\mathbf{L} + \mathbf{G})(V - V_{\text{ref}}) \equiv (\mathbf{L} + \mathbf{G})\mathbf{A} \quad (20)$$

其中, 定义全局变量  $e_v = [e_{v1}, e_{v2}, \dots, e_{vn}]^T$ ;  $V = [V_{G1}, V_{G2}, \dots, V_{Gn}]^T$ ; 并且  $V_{\text{ref}} = I_N \otimes V_{\text{ref}}$ ;  $\mathbf{A}$  为电压全局误差。

根据式(16)与式(18), 可以得到各个微型同步发电机机端电压控制输入量:

$$V_{ni} = \int u_{vi} = -\int c_i e_{vi} \quad (21)$$

然而式(18)设计的电压辅助控制器仅能保证各个微型同步发电机的机端电压值同步到某一设定的参考值  $V_{\text{ref}}$ 。为了消除关键母线的电压偏差, 需要对关键母线的电压进行测量, 引入 PI 控制器, 计算出可以精确恢复母线电压偏差的机端电压参考值  $V_{\text{ref}}$ 。含 PI 控制器的电压二次控制器如图 4 所示。

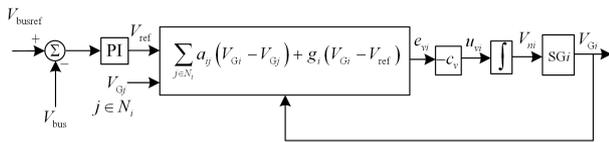


图 4 分布式二次电压协调控制框图

Fig. 4 Block diagram of distributed secondary voltage control

## 4 算例测试

### 4.1 算例系统的物理结构与通讯拓扑

为了验证本文设计的二次控制器的有效性, 在 Matlab/Simulink 中搭建某实际微电网模型进行测试。该实际孤岛微电网包含 3 台沼气发电机(可视为微型同步发电机)、1 个光伏发电系统、1 台储能装置及 1 个电容器组。微电网中的初始负荷总量为 7MW+5.25Mvar。该实际微电网的结构如图 5 所示。各个单元在出口端均连接一个变比为 380 V/10 kV 的升压变压器, 再通过一段线路连接到电压等级为 10 kV 的公共母线之中。系统的线路阻抗参数与变压器阻抗参数如表 1 所示。

由于该实际系统的结构相对简单, 参与二次控制的电源数量相对较少, 所以设计了如图 6 所示的通信结构, 各个微型同步发电机依次连接, 并选取

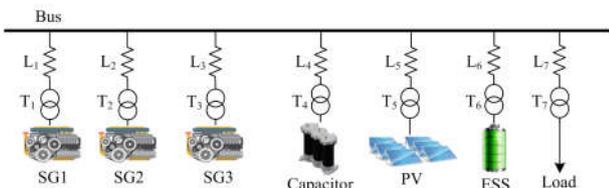


图 5 某实际孤岛微电网接线图

Fig. 5 Connection diagram of a real microgrid

表 1 微电网线路和变压器阻抗

Table 1 Impedances of lines and transformers in an islanded microgrid

| 线路标号              | 阻抗/ $\Omega$      |
|-------------------|-------------------|
| $L_1/L_2/L_3$     | $7.54e-3+j5e-3$   |
| $L_4/L_7$         | $4.98e-3+j3.3e-3$ |
| $L_5/L_6$         | $3.77e-3+j2.5e-3$ |
| $T_1/T_2/T_3$     | $0.336+j1.8$      |
| $T_4/T_5/T_6/T_7$ | $0.642+j4.8$      |

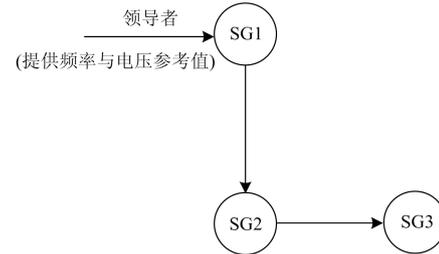


图 6 通讯拓扑图

Fig. 6 Communication topology diagram

在距离 10 kV 母线最近的 SG1 作为能接收领导者信息(参考值)的微型同步发电机, 将其牵引增益  $g_1$  设为 1, 其余发电机的牵引增益设为 0。

### 4.2 元件参数设置

#### 4.2.1 微型同步发电机

本文在 Simulink 中建立了微型同步发电机的具体模型, 包括了同步发电机基础模型、汽轮机、调速器、励磁控制系统及电力系统稳定器, 调速器与励磁系统控制参数的选取可参考文献[21]。微型同步发电机的相关参数如表 2 所示。

表 2 微型同步发电机参数

Table 2 Parameters of micro-synchronous generators in an islanded microgrid

| 发电机标号 | $\omega_{\text{ref}}/(\text{rad/s})$ | $R/\text{p.u.}$ | $P_{\text{max}}/\text{MW}$ | $[V_{\text{min}}, V_{\text{max}}]/\text{V}$ |
|-------|--------------------------------------|-----------------|----------------------------|---|
| SG1   | $50*2\pi$                            | 0.051           | 3.51                       | [342,418]                                   |
| SG2   | $50*2\pi$                            | 0.052           | 3.43                       | [342,418]                                   |
| SG3   | $50*2\pi$                            | 0.053           | 3.37                       | [342,418]                                   |

#### 4.2.2 光伏发电系统

由于二次调节的时间尺度相对较短, 光照强度的变化并不大, 所以在二次调节的过程中可以认为光伏的出力是恒定的。所以光伏电站采用恒功率控制, 在 Simulink 模型中用理想电流源模拟光伏发电, 输出有功功率与无功功率分别设为 1.5 MW+j1 Mvar。

#### 4.2.3 储能系统

本实际微电网系统采用铅酸蓄电池储能系统,

其主要工作为平抑由于负荷波动引起的系统电压与频率波动。储能系统的功率控制采用频率/有功控制和电压/无功控制<sup>[22]</sup>。当母线的频率和电压幅值与额定值存在一定的偏差时，储能系统就会启动。储能系统将系统频率与母线电压测量值与控制目标的设定值两者之间的差值作为功率控制器的输入量，从而得到储能装置的有功功率参考值与无功功率参考值。储能系统的功率控制框图如图 7 所示。相关参数如表 3 所示。

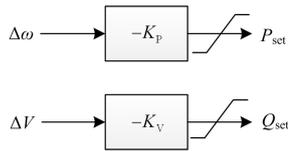


图 7 储能系统功率控制器  
Fig. 7 ESS power controller

储能系统功率控制器中的下垂系数定义了频率(电压)偏移的情况下激活的有功(无功)功率的多少。以有功为例，储能系统输出的最大有功值为 1.5 MW，当系统负荷偏差达到 1Hz 时，需要储能系统满发，所以  $K_p=(1.5\text{MW})/1\text{Hz}=1.5(\text{MW}/\text{Hz})$ 。无功下垂系数  $K_v$  的设定也与有功下垂系数的设定类似，不多加赘述。

表 3 储能系统参数

Table 3 Parameters of ESS in an islanded microgrid

|     | $S_{\max}/\text{MVA}$ | $P_{\max}/\text{MW}$ | $Q_{\max}/\text{Mvar}$ | $K_p$ | $K_v$ |
|-----|-----------------------|----------------------|------------------------|-------|-------|
| ESS | 1.8                   | 1.5                  | 1                      | 1.5   | 0.001 |

#### 4.2.4 电容器组

电容器组用 Simulink/powerlib 中自带的 RLC 模块构建。通过相关参数的设计使电容器在母线电压幅值为 10 kV 时发出 1.68 MVar 无功功率。

#### 4.3 电压/频率恢复测试

为了验证上述二次控制算法的有效性，将所设计的控制器应用于图 5 所示的微电网中。在这个例子中系统频率的额定值与母线电压的额定值分别为 50 Hz 与 10 kV，三台微型同步发电机的初始机端电压均设置为 380 V。仿真将分为 0~300 s、300~500 s、500~800 s 三个阶段。0~500 s，不投入二次控制，微电网仅仅采用一次控制。0~300 s 为微电网的初始化阶段，经过初始化后，在 300 s 时，微电网的频率稳定在 49.97 Hz 附近，此时微电网负荷增加  $0.6\text{MW}+j0.1\text{Mvar}$ ，随后微电网通过一次控制将系统的频率稳定在 49.95 Hz 附近。在  $t=500\text{ s}$  时微电网投入二次控制，其中式(6)、式(13)、式(18)中的控制增益  $c_\omega$ 、 $c_p$  和  $c_v$  分别设为 0.1、

0.1 和 0.5。投入二次控制信号后，频率响应曲线、母线电压响应曲线、机端电压响应曲线、电源和储能系统的输出有功和无功出力变化曲线及微型同步发电机有功均分比例变化曲线如图 8—图 13 所示。

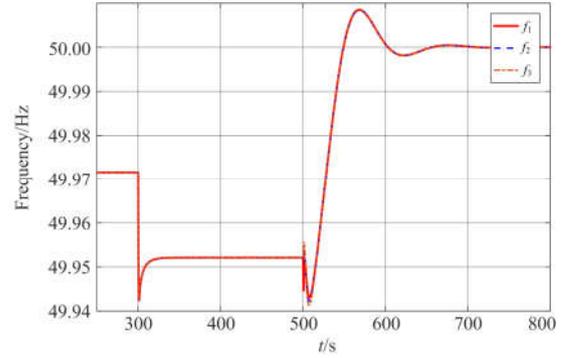


图 8 系统频率响应曲线

Fig. 8 Frequency response curve

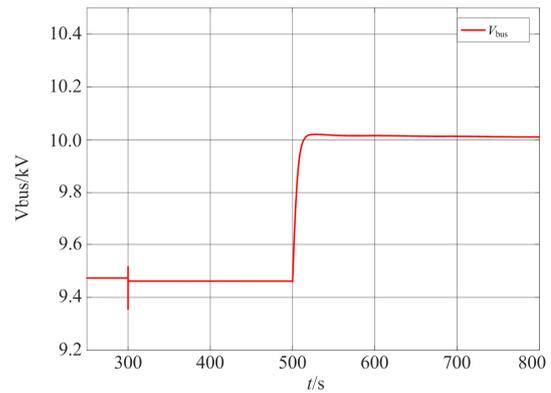


图 9 母线电压响应曲线

Fig. 9 Bus voltage response curve

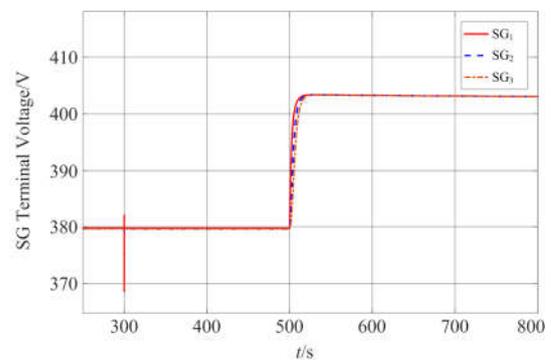


图 10 微型同步发电机机端电压响应曲线

Fig. 10 Terminal voltage response curve of micro-synchronous generators

从图 8—图 10 可见，投入二次电压/频率控制后，经过约 200 s 的调节时间，系统频率从 49.95 Hz 恢复到 50 Hz，三台微型同步发电机的机端电压从 380 V 校正到 402 V 左右，使得母线电压从 9.45 kV

恢复到 10 kV, 在调节过程中系统频率与母线电压幅值均没有产生较大的超调量。

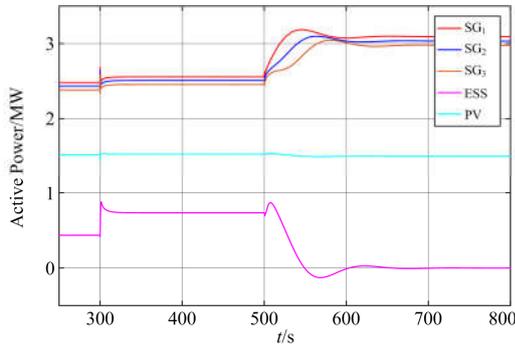


图 11 电源和储能的有功出力变化曲线

Fig. 11 Changes of active power outputs of power sources and ESS

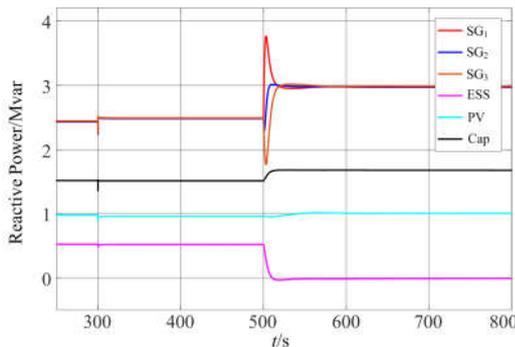


图 12 电源和储能的无功出力变化曲线

Fig. 12 Changes of reactive power outputs of power sources and ESS

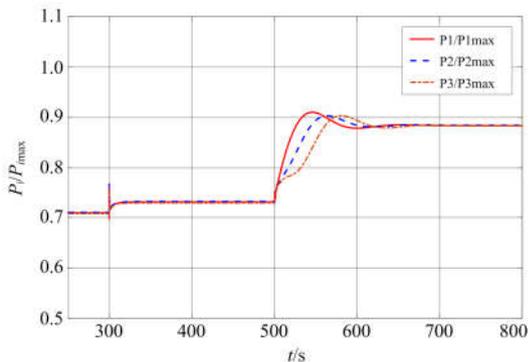


图 13 微型同步发电机有功均分比例变化曲线

Fig. 13 Changes of active power sharing ratio of micro-synchronous generators

从图 11 和图 12 可见, 光伏系统的有功和无功出力维持在恒定的水平, 储能系统的有功和无功出力也相应地根据系统频率与母线电压的变化而变化, 符合系统的预期。

从图 13 可见, 在投入二次控制前后, 3 台微

型同步发电机各自的有功功率出力与其相应的额定功率的比值最终同步到一个相同的值, 满足了式(10)的要求, 实现了微型同步发电机有功功率按额定比分配。

## 5 结论

本文针对以同步发电机组为二次控制主体的孤岛微电网, 利用反馈线性化方法, 设计了适用于同步发电机的二次频率/电压控制器, 并结合多代理系统理论将其分布式化, 所提出的分布式二次控制器可以消除由于同步发电机一次控制导致的系统频率与电压偏移, 并能实现同步发电机输出有功功率按额定比分配。

## 参考文献

- [1] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.  
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [2] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 100-107.  
LU Zongxiang, WANG Caixia, MIN Yong, et al. Study on some key problems and technique related to microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100-107.
- [3] 刘文, 杨慧霞, 祝斌. 微电网关键技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 152-155.  
LIU Wen, YANG Huixia, ZHU Bin. Survey on key technologies of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 152-155.
- [4] GUO W, MU L. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 56-62. DOI: 10.1186/s41601-016-0019-8.
- [5] 刘宁宁, 曹炜, 赵晋斌. 直流微电网的一种增量下垂控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 24-30.  
LIU Ningning, CAO Wei, ZHAO Jinbin. An incremental droop control method for DC micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 24-30.
- [6] 米阳, 吴彦伟, 符杨, 等. 独立光储直流微电网分层协调控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 37-45.  
MI Yang, WU Yanwei, FU Yang, et al. Hierarchical coordinated control of island DC microgrid with photovoltaic and storage system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 37-45.
- [7] 施永, 赖纪东, 苏建徽, 等. 微网系统运行模式平滑切换控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(8): 85-91.

- SHI Yong, LAI Jidong, SU Jianhui, et al. Control strategy of seamless transfer for microgrid operation mod[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(8): 85-91.
- [8] 陈鹏飞, 邓玮璋. 基于 Zigbee 通信网络的低压微电网分布式功率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 115-122.
- CHEN Pengfei, DENG Weihua. Distributed power control for low voltage microgrid based on Zigbee communication network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 115-122.
- [9] MENG W, WANG X, LIU S. Distributed load sharing of an inverter-based microgrid with reduced communication[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 9(2): 1354-1364.
- [10] BIDRAM A, DAVOUDI A, LEWIS F L, et al. Secondary control of microgrids based on distributed cooperative control of multi-agent systems[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2013, 7(8): 822-831.
- [11] BIDRAM A, DAVOUDI A, LEWIS F L, et al. Distributed cooperative secondary control of microgrids using feedback linearization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 3462-3470.
- [12] DENG Z, XU Y, SUN H, et al. Distributed, bounded and finite-time convergence secondary frequency control in an autonomous microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2776-2788.
- [13] 田雨青, 郑天文, 陈来军, 等. 基于自适应调节的虚拟同步发电机频率控制[J]. 南方电网技术, 2014, 8(5): 76-79.
- TIAN Yuqing, ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, et al. The frequency control of virtual synchronous generator based on adaptive adjusting[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(5): 76-79.
- [14] 杨向真, 苏建徽, 丁明, 等. 微电网孤岛运行时的频率控制策略[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 164-168.
- YANG Xiangzhen, SU Jianhui, DING Ming, et al. Research on frequency control for microgrid in islanded operation[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 164-168.
- [15] 吴亮. 利用微电网提高垃圾填埋场清洁能源利用率[J]. 广东电力, 2018, 31(2): 65-69.
- WU Liang. Improvement of use ratio of clean energy on landfill by using micro-grid technology[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(2): 65-69.
- [16] 马艺玮, 杨苹, 陈思哲, 等. 含柴油发电机和蓄电池储能的独立微电网频率分层控制[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(8): 1098-1105.
- MA Yiwei, YANG Ping, CHEN Sizhe, et al. Frequency hierarchical control for islanded micro-grid consisting of diesel generator and battery energy storage system[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(8): 1098-1105.
- [17] 马艺玮, 杨苹, 王月武, 等. 提高电能质量的风柴蓄独立微电网分层协调控制[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 104-111.
- MA Yiwei, YANG Ping, WANG Yuewu, et al. Hierarchical coordinated control of islanded wind-diesel-battery microgrid for improving power quality[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2015, 43(4): 104-111.
- [18] 王葵, 孙莹. 电力系统自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 72-77.
- [19] 张俊峰, 李鹏, 苏寅生, 等. 励磁系统调差系数优化整定存在的风险分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 141-145, 151.
- ZHANG Junfeng, LI Peng, SU Yinsheng, et al. Risk analysis on optimization and setting for system reactive current compensation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 141-145, 151.
- [20] 肖湘宁, 王鹏, 陈萌. 基于分布式多代理系统的孤岛微电网二次电压控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(8): 1894-1902.
- XIAO Xiangning, WANG Peng, CHEN Meng. Secondary voltage control in an island microgrid based on distributed multi-agent system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8): 1894-1902.
- [21] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [22] 李建林, 牛萌, 张博越, 等. 电池储能系统机电暂态仿真模型[J]. 电工技术学报, 2018, 33(8): 1911-1918.
- LI Jianlin, NIU Meng, ZHANG Boyue, et al. Simulation model of battery energy storage system in electromechanical transient[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8): 1911-1918.

收稿日期: 2018-08-14; 修回日期: 2018-09-29

作者简介:

吴亮(1983—), 男, 工学学士, 工程师, 主要从事垃圾填埋场、垃圾焚烧发电厂电气专业技术管理工作; E-mail: 18988992042@163.com.

刘庆楷(1996—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为主动配电网和微电网能量管理与运行控制; E-mail: 295317256@qq.com

唐 翀(1993—), 男, 博士研究生, 研究方向为主动配电网和微电网能量管理与运行控制。E-mail: tc\_tju1895@163.com

(编辑 张爱琴)